

日本の女子新体操一線級選手におけるパンシェローテーション動作の バイオメカニクスの研究

Biomechanics study on *Penche rotation* in Japanese elite female rhythmic gymnast

山本 里佳*, 立澤 孝菜**, 平野 智也*, 古田 なつみ*, 田中 重陽*, 船渡 和男*

Rika YAMAMOTO*, Takana TATSUZAWA**, Tomoya HIRANO*
Natsumi FURUTA*, Shigeharu TANAKA* and Kazuo FUNATO*

Abstract

This study aimed to compare the angular momentum during *Penche rotations* in skilled and unskilled rhythmic gymnastics. Eleven collegiate female rhythmic gymnasts participated in this study. The experimental trial consisted of *Penche rotations* intended to turn many number of rotations as possible. The skilled group (n=6) consisted of athletes who could perform 2 to 3 rotations, and the unskilled group (n=5) consisted of athletes who performed one rotation or less. Kinematics data were collected using a motion capture system to calculate angular momentum around the body's center of gravity and the z-axis for each segment. The skilled group that performed two to three *Penche rotation* rotations had significantly greater angular momentum around the body center of gravity, head, trunk, pelvis, left upper extremity, and free leg than the unskilled group. The maximum angular momentum of the right upper limb in the preparatory phase was significantly greater in the skilled group than in the unskilled group. These results suggest that the movements of the left and right upper limbs and the free leg in the preparatory phase are important to increase the number of *Penche rotations*.

Key words; Rhythmic Gymnastics, Penche Rotation, Angular Momentum

I. 緒 言

新体操では、ジャンプ、バランスおよびローテーションの3種類の身体難度がある。身体難度

とは、新体操の採点規則に規定されている難度表の要素である。新体操の得点は、難度点と実施点の合計で構成されており、難度点は身体難度と手具の難度に分けられる。ローテーション難度とは、

* 国士舘大学大学院スポーツ・システム研究科 (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

** 東京都スポーツ文化事業団 (Tokyo Sport Benefits Corporation)

身体または片脚支持で回転する動作を指し、2つのカテゴリーに分けられる。1つはピボットターン（またはピルエット／左右足を交互に踏み変える踵を上げて実施するその場回転）¹⁾と呼ばれる運動であり、2つ目はローテーション（片脚踵支持の回転、または身体での回転）と呼ばれる運動である。新体操採点規則において、ローテーション難度は「形が固定され明確であること」「最低360度以上の基本回転が必要である」と記載されている²⁾。本研究で扱うパンシェローテーションにおける明確で固定された形とは、支持を伴わず胴が水平面で180度の後方開脚である。パンシェローテーションは基本回転が0.4点で、2回転目以降から1回転につき0.1点ずつ加点される。したがって、ローテーション難度は、他の身体難度と異なり加点を追加することができる唯一の身体難度であるため、選手の得点獲得のために重要な要素である。

これまでに、新体操のローテーションに関する先行研究³⁾では、パンシェバランスの動作に関わる筋活動解析やパンシェローテーションの重心軌跡などバイオメカニクスの観点から検討されている。その結果、パンシェバランスでは拳上脚側の脊柱起立筋が最も高い筋放電位を示すこと、パンシェローテーションの軸足ではCOPを踵側に置きながら股関節を外旋させて軸足足尖点を外転側に移動し、さらにCOPを足尖点側に移しながら股関節を外旋させ踵部を内転側に移させることで、回転角速度の減少を抑えていることが報告されている。

一方、パンシェローテーションにおける回転数の増加には鉛直軸周りの身体各部位の角運動量を大きくすることが重要であると考えられるが、パンシェローテーション中の角運動量を報告した研究はみられない。また、ローテーション難度に限らず新体操の身体難度では、明確な形が完成してから採点が開始されるため、難度の得点獲得には形が完成するまでの準備局面が重要であると考えられる。これまでパンシェローテーションの動作

解析の研究では、パンシェ完成以降の片脚支持局面のキネマティクス分析しかなされておらず、パンシェローテーションの準備局面から分析を行った研究はない。このことから、上位選手と下位選手の技術の差を定量化し、準備局面の重要性と回転数の増加に関する要因とパンシェローテーションの特性を明らかにすることで、具体的な指導ポイントを明確にでき、新体操選手の競技力向上や指導現場に有効な資料提供が可能になると考えられる。

そこで、本研究では、女子新体操競技の専門動作であるパンシェローテーションを上位選手と下位選手と比較し、より高得点で、回転を重ねるために必要な要素と準備局面の重要性について検討することを目的とした。バレエのピルエットやフットターンにおける角運動量を報告した研究^{4,6)}によると、回転に必要な全身の角運動量の多くが上肢を体幹に引き寄せることにより上肢によって生成されることが報告されている。したがって、本研究では、「パンシェローテーションの回転数を増加させるために、上位群は下位群と比較して鉛直軸周りの角運動量が大きく、準備局面において動脚および左右上肢の動作を強調している」という仮説を立てた。

II. 方法

1. 被験者

被験者は、K大学女子新体操部員11名とした。全被験者は現役新体操選手であり、10年以上の競技歴を有している者であった。これらの被験者を、対象試技であるパンシェローテーションを2～3回転実施できた選手6名を上位群（年齢：19.2±1.0歳、競技歴：13.8±1.7年、身長：159.8±4.4cm、体重：55.8±6.1kg）、1回転以下であった選手5名を下位群（年齢：19.4±1.1歳、競技歴：13.6±1.5年、身長：161.8±4.7cm、体重：56.0±3.9kg）に群分けした。研究の目的と方法及び安全性について十分に説明し、任意による参加の同

意を得た。なお、本研究は国土館大学研究倫理委員会の審査を受けて承認（受付番号：22019）を得た後に実施した。

2. 運動課題

本研究の対象試技は踵支持ありのパンシェローテーション難度とした。試技では回転数に制限をかけなかった。

3. データ収集と解析

被験者の身体には合計59個の14mm反射マーカーを貼付した。三次元動作解析装置VICON 14台（Oxford社製、UK）を使用し、250Hzでマーカーの位置座標を計測した。フォースプレートは、横900mm、縦600mmのフォースプレート（Kistler社製、Switzerland）を2枚用いて、地面反力の測定を1kHzで行った。2枚のフォースプレートを囲むように14台のVICONカメラを設置した。本研究で用いたVICONおよびフォースプレートの座標系はGlobal Coordinate System座標系として定義し、左右軸をx軸、前後軸をy軸、x軸とy軸に直行した軸をz軸とした。試技は、1枚目のフォースプレート（手前側）に両脚を着いて停止した後、動作開始とともに2枚目のフォースプレート（奥側）に軸足を接地させて実験を行った。

本研究の分析では、頭部、体幹、骨盤、左右上腕、左右前腕、左右手部、左右大腿、左右下腿および左右足部の15セグメントからなる剛体リンクセグメントモデルを使用した。各セグメントの質量比は、Dempsterの報告⁷⁾に基づいて推定した。データ分析はモーションキャプチャー解析ソフトNexus 2.11.0（Oxford社製）およびVisual3Dソフト（C-motion, Germantown, MD, USA）を用いて解析を行った。

3. 分析項目

分析対象は、5段階での自己評価と国際審判資格を所持する審判員1名の採点で評価が最も高い試技とした。

鉛直軸における身体重心周りの角運動量（ L ）は15セグメントの角運動量の和として算出した。

$$L = \sum_{i=1}^n [I_i \omega_i + r_i \times m_i v_i]$$

ここで、各セグメント*i*について、 I_i は個々の慣性モーメント、 ω_i は角速度、 r_i は質量中心から身体重心までの距離、 m_i は質量、 v_i は並進速度を示す。

また、頭部、体幹、骨盤、右上肢、左上肢、右下肢（軸脚）および左下肢（動脚）の角運動量を算出した。

全被験者の軸脚は右脚であり、回転方向の定義は、正の値が回転方向、負の値が反回転方向とした。

Z軸における角運動量の解析部位については、身体重心周り、頭、体幹、骨盤、右上肢、左上肢、右下肢（軸脚）および左下肢（動脚）とした。全被験者の軸足は右脚であり、回転方向の定義は、正の値が回転方向、負の値が反回転方向とした。

4. 分析局面

本研究における動作のイベント、局面および回転数の定義を図1に示す。準備局面は軸脚接地（図1A）から最大開脚（図1E）までとし、回転局面は最大開脚（図1E）から回転終了（図1L）までとした。

5. 統計解析

上位群と下位群の角運動量の比較は、対応なしのt検定により有意差の検定を行った。統計処理には、統計処理ソフトStat-View.Ver.5.0を用いた。本研究では危険率5%未満を有意とした。

Ⅲ. 結果

図2に上位群1名と下位群1名のパンシェローテーション中の鉛直軸周りの角運動量の典型例を

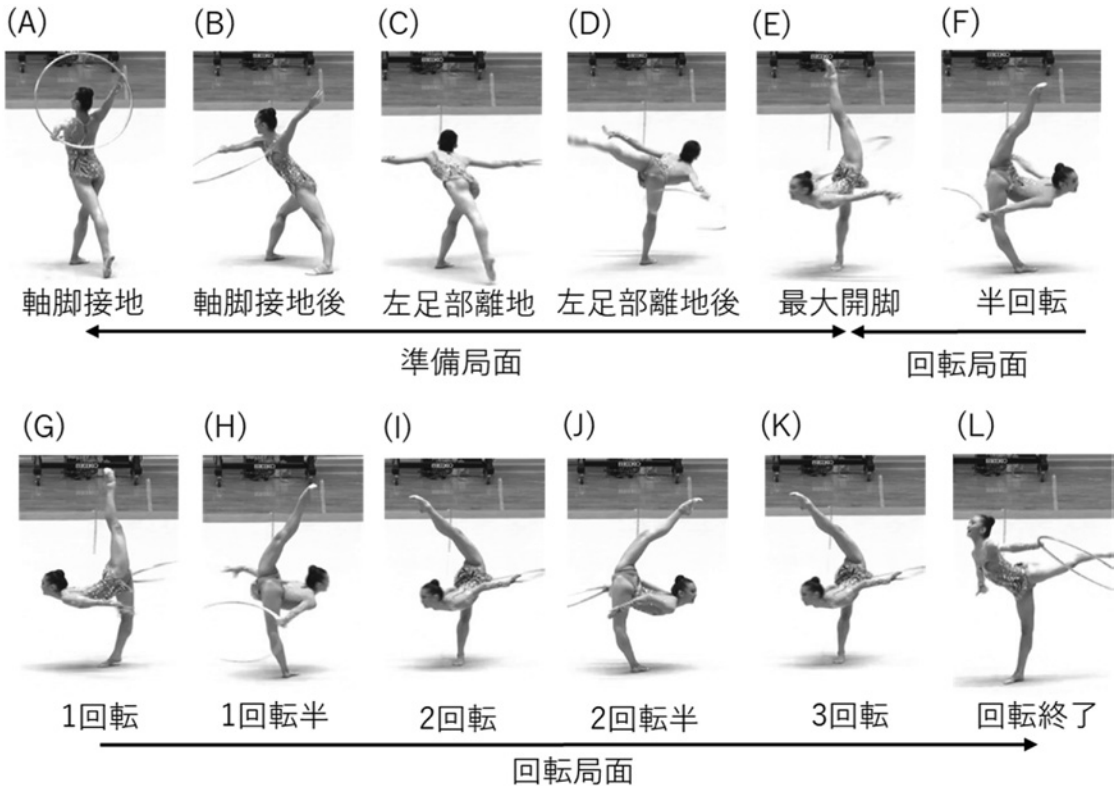


図1 パンシェローテーションにおける動作のイベント、局面および回転数の定義

示す。試技で実施されたパシエローテーションの回転数は、上位選手が3回転、下位選手が1回転であった。上位選手は、準備局面において左右上肢が同程度の正の角運動量を示したのち、動脚が大きな正の角運動量を示し、その後身体重心周りの正の角運動量が最大となった。一方、下位選手は上位選手と比較して、準備局面における左上肢の正の角運動量が小さく、動脚および身体重心周りの正の角運動量も小さい傾向を示した。

表1にパンシェローテーションにおける上位群と下位群の角運動量の比較を示す。動作全体をみると、上位群は下位群と比較して、身体重心周り、頭、体幹、骨盤、左上肢および動脚の角運動量最大値が有意に大きかった（それぞれ $p < 0.05$ ）。準備局面において、身体重心周りおよび各部位の角運動量最小値は上位群と下位群との間に有意な差がなかった。一方、準備局面における右上肢の角

運動量最大値は上位群が下位群よりも有意に大きな値を示した（ $p < 0.05$ ）。

IV. 考 察

本研究の目的は、女子新体操競技の専門動作であるパンシェローテーションを上位選手と下位選手で比較し、より高得点で、回転を重ねるために必要な要素と準備局面の重要性について検討することであった。その結果、パンシェローテーションを2～3回転実施できた上位群は下位群と比較して身体重心周り、頭、体幹、骨盤、左上肢および動脚の角運動量最大値が有意に大きいことが示された。また、準備局面における右上肢の角運動量最大値は上位群が下位群よりも有意に大きな値を示した。したがって、本研究の「パンシェローテーションの回転数を増加させるために、上位群

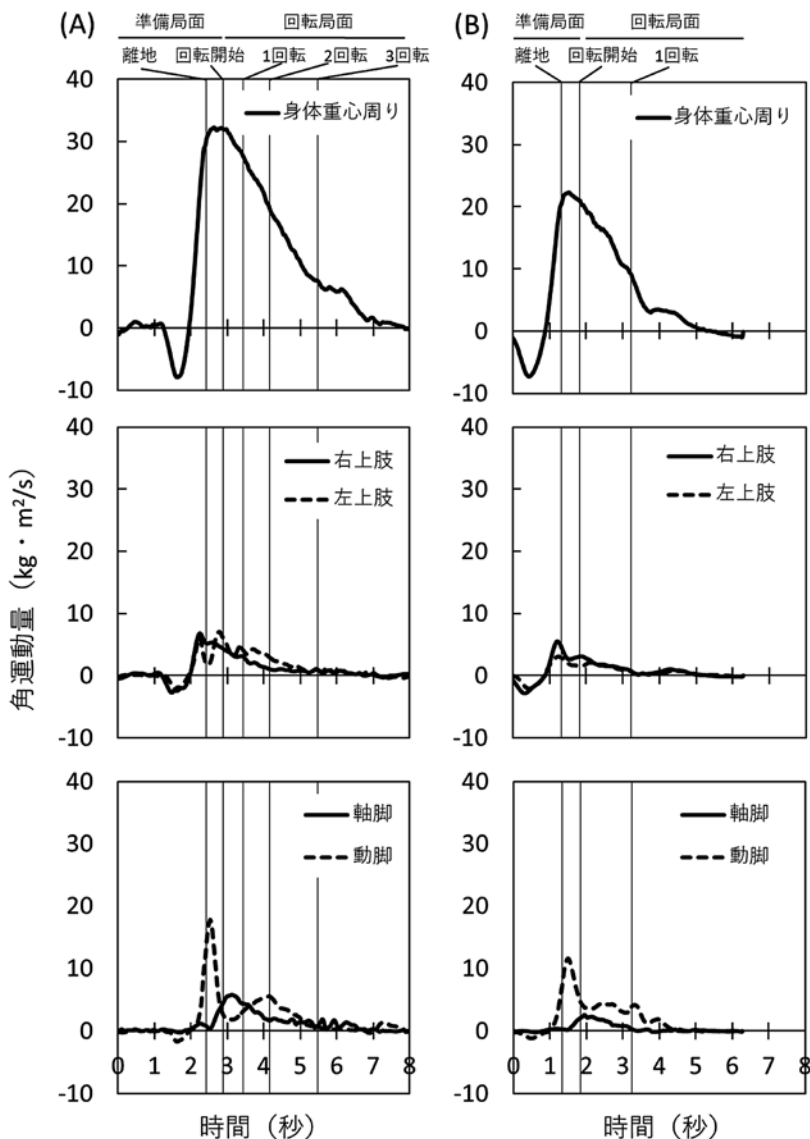


図2 パンシェローテーションにおける角運動量の典型例 (A) 上位選手 (n=1)、(B) 下位選手 (n=1)

は下位群と比較して鉛直軸周りの角運動量が大きく、準備局面において動脚および右上肢の動作を強調している」という仮説は支持された。

表1に示したように、動作全体をみると、上位群は下位群と比較して、身体重心周り、頭、体幹、骨盤、左上肢および動脚の角運動量最大値が有意に大きかった。パンシェローテーションの実施回数が多かった上位群の角運動量が大きかった結果

は、バレエのピルエットやフェッターンで多く回転するために角運動量を生成しているという先行研究⁴⁻⁶⁾と同様であった。また、ピルエットやフェッターンでは全身の角運動量の多くが上肢を体幹に引き寄せることにより上肢によって生成されることが報告されている⁴⁻⁶⁾。したがって、本研究のパンシェローテーションにおいても上肢の動作が身体重心周りの角運動量に貢献している

表1 上位群と下位群における角運動量の比較

局面	部位	変数	単位	上位群 (n=6)	下位群 (n=5)
全体	身体重心周り			34.6 ± 3.1 *	26.1 ± 4.5
	頭			5.4 ± 0.7 *	4.0 ± 1.0
	体幹			5.8 ± 0.5 *	4.4 ± 0.8
	骨盤			3.5 ± 0.5 *	2.6 ± 0.8
	右上肢	角運動量最大値	kg · m ² /s	7.2 ± 1.1	6.0 ± 1.5
	左上肢			7.1 ± 1.3 *	4.4 ± 1.5
	軸脚			4.7 ± 0.9	3.6 ± 1.7
	動脚			19.0 ± 3.0 *	12.8 ± 2.8
準備局面	身体重心周り			-8.6 ± 0.9	-7.4 ± 1.8
	頭			-0.1 ± 0.1	-0.1 ± 0.0
	体幹			-1.2 ± 0.1	-1.0 ± 0.3
	骨盤			-0.1 ± 0.0	-0.1 ± 0.1
	右上肢	角運動量最小値	kg · m ² /s	-3.1 ± 0.8	-3.0 ± 0.7
	左上肢			-2.9 ± 0.7	-2.3 ± 0.7
	軸脚			-0.1 ± 0.1	0.0 ± 0.2
	動脚			-1.1 ± 0.8	-0.8 ± 0.5
	身体重心周り			34.3 ± 2.7	26.1 ± 4.5
	頭			3.2 ± 1.0	2.6 ± 0.6
	体幹			4.6 ± 1.1	3.7 ± 0.9
	骨盤			1.5 ± 0.7	1.2 ± 0.3
	右上肢	角運動量最大値	kg · m ² /s	4.8 ± 0.6 *	3.6 ± 1.0
	左上肢			3.1 ± 1.9	2.5 ± 0.9
	軸脚			1.3 ± 1.4	0.5 ± 0.1
	動脚			15.7 ± 5.0	12.0 ± 3.3

* : p<0.05.

ことが示唆された。

一方、バレエのピルエットやフェットターンとは異なり、新体操のパンシェローテーションでは動脚を挙上しながらローテーションすることが特徴となっている。軸脚接地から最大開脚までの準備局面に着目すると、右上肢の角運動量最大値は上位群が下位群よりも有意に大きな値を示した。また、左上肢や動脚の角運動量最大値も上位群が大きな傾向を示した。準備局面において角運動量が出現する順序は、左右上肢に次いで動脚が大きな角運動量を示すため、上位群は左右上肢を体幹に引き寄せた後に動脚の挙上によって大きな身体重心周りの角運動量を生成しているものと推察さ

れた。

本研究からの実践現場への示唆として、準備局面では初めに反回転方向への踏み込み動作を大きくすること、次に回転方向への切り替わりの早い段階で左右上肢の大きい振り込み動作を行い、挙上脚側の体幹伸展と股関節伸展筋を使って左足部離地時の初速を上げることが重要であると考えられる。さらに回転局面では、獲得した角運動量や勢いを維持するために、回転開始のパンシェの形を回転終了まで固定して動脚の安定性を高め、パンシェの姿勢を保持しながら右上肢を体幹に近づけることで、角運動量と回転の速度を維持できると推察される。これらのポイントを意識したト

レーニングや指導をすることがより美しいパンシェローテーションの実施に繋がるものと考えられた。

V. 結 論

本研究の目的は、女子新体操競技の専門動作であるパンシェローテーションを上位選手と下位選手で比較し、より高得点で、回転を重ねるために必要な要素と準備局面の重要性について検討することであった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①パンシェローテーションを2～3回転実施できた上位群は下位群と比較して身体重心周り、頭、体幹、骨盤、左上肢および動脚の角運動量最大値が有意に大きかった。
 - ②準備局面における右上肢の角運動量最大値は上位群が下位群よりも有意に大きな値を示した。
- 以上の結果より、パンシェローテーションの回数を増加させるためには、準備局面において左右上肢および動脚の動作が重要となることが示唆された。

文献

- 1) 金子公宥, 福永哲夫. バイオメカニクス: 身体運動の科学的基礎. 森下はるみ, 410, 2004.
- 2) 日本体操協会: 2022-2024年新体操女子採点規則, (公財)日本体操協会(東京), 2022
- 3) 小野田桂子, 池和田克彦, 長谷川洋子, 秋山エリカ, 新海萌子, 若山章信. パンシェターンの動作分析. 東京女子体育大学女子体育研究所所報, 15: 47-53, 2021.
- 4) Imura A, Iino Y, Koike S. Dancers utilize a 'whip-like effect' to increase arm angular momentum during multiple-revolution pirouette en dehors. *Sports Biomechanics* : 1-19, 2022.
- 5) Imura A, Iino Y, Kojima T. Biomechanics of the continuity and speed change during one revolution of the Fouette turn. *Human movement science* 27 : 903-913, 2008.
- 6) Kim J, Wilson MA, Singhal K, Gamblin S, Suh C-Y, Kwon Y-H. Generation of vertical angular momentum in single, double, and triple-turn pirouette en dehors in ballet. *Sports Biomechanics* 13 : 215-229, 2014.
- 7) Dempster WT. *Space requirements of the seated operator : geometrical, kinematic, and mechanical aspects of the body with special reference to the limbs*. Vol. 159, Wright Air Development Center Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1955.